

# Inhaltsverzeichnis

Liste der wichtigsten verwendeten Symbole . . . . .	XIX
<b>1. Einleitung . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 Klassische Physik und Quantenphysik . . . . .	1
1.2 Kurzer historischer Überblick . . . . .	1
<b>2. Masse und Größe des Atoms . . . . .</b>	<b>5</b>
2.1 Was ist ein Atom? . . . . .	5
2.2 Bestimmung der Masse . . . . .	5
2.3 Methoden zur Bestimmung der Loschmidt-Zahl . . . . .	7
2.3.1 Elektrolyse . . . . .	7
2.3.2 Gas- und Boltzmann-Konstante . . . . .	7
2.3.3 Röntgenbeugung an Kristallen . . . . .	8
2.3.4 Messung mit Hilfe des radioaktiven Zerfalls . . . . .	10
2.4 Bestimmung der Größe des Atoms . . . . .	10
2.4.1 Anwendung der kinetischen Gastheorie . . . . .	10
2.4.2 Der Wirkungsquerschnitt . . . . .	11
2.4.3 Experimentelle Bestimmung von Wirkungsquerschnitten . . . . .	14
2.4.4 Bestimmung der Größe von Atomen aus dem Kovolumen . . . . .	15
2.4.5 Größe von Atomen aus Messungen der Röntgenbeugung an Kristallen . . . . .	16
2.4.6 Kann man einzelne Atome sehen? . . . . .	21
Aufgaben . . . . .	25
<b>3. Die Isotopie . . . . .</b>	<b>27</b>
3.1 Das Periodische System der Elemente . . . . .	27
3.2 Massenspektroskopie . . . . .	29
3.2.1 Parabelmethode . . . . .	29
3.2.2 Verbesserte Massenspektrometer . . . . .	32
3.2.3 Ergebnisse der Massenspektroskopie . . . . .	34
3.2.4 Moderne Anwendungen der Massenspektrometer . . . . .	34
3.2.5 Isotopentrennung . . . . .	35
Aufgaben . . . . .	37
<b>4. Kernstruktur des Atoms . . . . .</b>	<b>39</b>
4.1 Durchgang von Elektronen durch Materie . . . . .	39
4.2 Durchgang von $\alpha$ -Teilchen durch Materie (Rutherford-Streuung) . . . . .	41
4.2.1 Einige Eigenschaften von $\alpha$ -Teilchen . . . . .	41
4.2.2 Streuung von $\alpha$ -Teilchen in einer Folie . . . . .	42
4.2.3 Ableitung der Rutherfordschen Streuformel . . . . .	43
4.2.4 Experimentelle Ergebnisse . . . . .	48
4.2.5 Was heißt Kernradius? . . . . .	49
Aufgaben . . . . .	50

<b>5. Das Photon</b>	53
5.1 Licht als Welle	53
5.2 Die Temperaturstrahlung	55
5.2.1 Spektrale Verteilung der Hohlraumstrahlung	55
5.2.2 Die Plancksche Strahlungsformel	58
5.2.3 Ableitung der Planckschen Formel nach Einstein	59
5.3 Photoeffekt (Lichtelektrischer Effekt)	62
5.4 Der Comptoneffekt	65
5.4.1 Experimente	65
5.4.2 Ableitung der Comptonverschiebung	66
Aufgaben	69
<b>6. Das Elektron</b>	73
6.1 Erzeugung freier Elektronen	73
6.2 Größe des Elektrons	73
6.3 Die Ladung des Elektrons	74
6.4 Die spezifische Ladung $e/m$ des Elektrons	75
6.5 Elektronen und andere Teilchen als Wellen	78
6.6 Atominterferometrie	82
Aufgaben	83
<b>7. Einige Grundeigenschaften der Materiewellen</b>	85
7.1 Wellenpakete	85
7.2 Wahrscheinlichkeitsdeutung	89
7.3 Die Heisenbergsche Unschärferelation	92
7.4 Die Energie-Zeit-Unschärferelation	94
7.5 Einige Konsequenzen aus der Unschärferelation für gebundene Zustände	94
Aufgaben	97
<b>8. Das Bohrsche Modell des Wasserstoff-Atoms</b>	99
8.1 Spektroskopische Vorbemerkungen	99
8.2 Das optische Spektrum des Wasserstoff-Atoms	101
8.3 Die Bohrschen Postulate	105
8.4 Einige quantitative Folgerungen	108
8.5 Mitbewegung des Kerns	109
8.6 Wasserstoff-ähnliche Spektren	111
8.7 Myonen-Atome	113
8.8 Anregung von Quantensprüngen durch Stoß	116
8.9 Sommerfelds Erweiterung des Bohrschen Modells und experimentelle Begründung einer zweiten Quantenzahl	119
8.10 Aufhebung der Bahnentartung durch relativistische Massenveränderung	120
8.11 Grenzen der Bohr-Sommerfeld-Theorie. Bedeutung des Korrespondenzprinzips	121
8.12 Rydberg-Atome	122
8.13 Exotische Atome: Positronium, Myonium, Antiwasserstoff	124
Aufgaben	127
<b>9. Das mathematische Gerüst der Quantentheorie</b>	131
9.1 Das im Kasten eingesperrte Teilchen	131
9.2 Die Schrödinger-Gleichung	135
9.3 Das begriffliche Gerüst der Quantentheorie	138

9.3.1	Messungen, Meßwerte und Operatoren . . . . .	138
9.3.2	Impulsmessung und Impulswahrscheinlichkeit . . . . .	138
9.3.3	Mittelwerte, Erwartungswerte . . . . .	139
9.3.4	Operatoren und Erwartungswerte . . . . .	143
9.3.5	Bestimmungsgleichungen für die Wellenfunktion . . . . .	144
9.3.6	Gleichzeitige Meßbarkeit und Vertauschungsrelationen . . . . .	145
9.4	Der quantenmechanische Oszillator . . . . .	148
	Aufgaben . . . . .	155
<b>10.</b>	<b>Quantenmechanik des Wasserstoff-Atoms . . . . .</b>	<b>159</b>
10.1	Die Bewegung im Zentralfeld . . . . .	159
10.2	Drehimpuls-Eigenfunktionen . . . . .	161
10.3	Der Radialteil der Wellenfunktion beim Zentralfeld* . . . . .	167
10.4	Der Radialteil der Wellenfunktion beim Wasserstoffproblem . . . . .	169
	Aufgaben . . . . .	175
<b>11.</b>	<b>Aufhebung der <i>l</i>-Entartung in den Spektren der Alkali-Atome . . . . .</b>	<b>177</b>
11.1	Schalenstruktur . . . . .	177
11.2	Abschirmung . . . . .	179
11.3	Das Termschema . . . . .	180
11.4	Tiefere Schalen . . . . .	185
	Aufgaben . . . . .	185
<b>12.</b>	<b>Bahn- und Spin-Magnetismus, Feinstruktur . . . . .</b>	<b>187</b>
12.1	Einleitung und Übersicht . . . . .	187
12.2	Magnetisches Moment der Bahnbewegung . . . . .	188
12.3	Präzession und Orientierung im Magnetfeld . . . . .	190
12.4	Spin und magnetisches Moment des Elektrons . . . . .	192
12.5	Messung des gyromagnetischen Verhältnisses nach Einstein und de Haas . . . . .	194
12.6	Nachweis der Richtungsquantelung durch Stern und Gerlach . . . . .	195
12.7	Feinstruktur und Spin-Bahn-Kopplung, Übersicht . . . . .	197
12.8	Berechnung der Spin-Bahn-Aufspaltung im Bohrschen Atommodell . . . . .	198
12.9	Niveauschema der Alkali-Atome . . . . .	202
12.10	Feinstruktur beim Wasserstoff-Atom . . . . .	203
12.11	Die Lamb-Verschiebung . . . . .	204
	Aufgaben . . . . .	208
<b>13.</b>	<b>Atome im Magnetfeld, Experimente und deren halbklassische Beschreibung . . . . .</b>	<b>211</b>
13.1	Richtungsquantelung im Magnetfeld . . . . .	211
13.2	Die Elektronenspin-Resonanz . . . . .	211
13.3	Zeeman-Effekt . . . . .	214
13.3.1	Experimente . . . . .	214
13.3.2	Erklärung des Zeeman-Effekts vom Standpunkt der klassischen Elektronentheorie . . . . .	216
13.3.3	Beschreibung des normalen Zeeman-Effekts im Vektormodell . . . . .	218
13.3.4	Der anomale Zeeman-Effekt . . . . .	220
13.3.5	Magnetisches Moment bei Spin-Bahn-Kopplung . . . . .	221
13.4	Der Paschen-Back-Effekt . . . . .	223
13.5	Doppelresonanz und optisches Pumpen . . . . .	224
	Aufgaben . . . . .	226

<b>14. Atome im Magnetfeld, quantenmechanische Behandlung</b> . . . . .	229
14.1 Quantentheorie des normalen Zeeman-Effekts . . . . .	229
14.2 Die quantentheoretische Behandlung des Elektronen- und Protonenspins . . . . .	231
14.2.1 Der Spin als Drehimpuls . . . . .	231
14.2.2 Spinoperatoren, Spinmatrizen und Spinwellenfunktion . . . . .	232
14.2.3 Die Schrödinger-Gleichung des Spins im Magnetfeld . . . . .	235
14.2.4 Beschreibung der Spinpräzession mittels Erwartungswerten . . . . .	236
14.3 Die quantenmechanische Behandlung des anomalen Zeeman-Effekts mit der Spin-Bahn-Kopplung* . . . . .	239
14.4 Quantentheorie des Spins in einem konstanten und einem dazu transversalen zeitabhängigen Magnetfeld . . . . .	243
14.5 Die Blochschen Gleichungen . . . . .	247
14.6 Relativistische Theorie des Elektrons. Die Dirac-Gleichung . . . . .	251
14.7 Das Wasserstoff-Atom in hohen Magnetfeldern* . . . . .	256
14.7.1 Rydberg-Atome in hohen Feldern . . . . .	258
14.7.2 Was ist Chaos? Eine Erinnerung an die klassische Mechanik . . . . .	259
14.7.3 Quantenchaos . . . . .	261
14.7.4 Das Wasserstoff-Atom im hohen Magnetfeld und in niedrigen Quantenzuständen . . . . .	263
Aufgaben . . . . .	266
<b>15. Atome im elektrischen Feld</b> . . . . .	269
15.1 Beobachtung des Stark-Effekts . . . . .	269
15.2 Quantentheorie des linearen und quadratischen Stark-Effekts . . . . .	271
15.2.1 Der Hamiltonoperator . . . . .	271
15.2.2 Der quadratische Stark-Effekt. Störungstheorie ohne Entartung* . . . . .	272
15.2.3 Der lineare Stark-Effekt. Störungstheorie mit Entartung* . . . . .	275
15.3 Die Wechselwirkung eines Zwei-Niveau-Atoms mit einem kohärenten resonanten Lichtfeld . . . . .	278
15.4 Spin- und Photonenecho . . . . .	282
15.5 Ein Blick auf die Quantenelektrodynamik* . . . . .	285
15.5.1 Die Quantisierung des elektromagnetischen Feldes . . . . .	285
15.5.2 Massenrenormierung und Lamb-Verschiebung . . . . .	290
15.6 Atome in sehr starken elektrischen Feldern . . . . .	297
Aufgaben . . . . .	301
<b>16. Allgemeine Gesetzmäßigkeiten optischer Übergänge</b> . . . . .	303
16.1 Symmetrien und Auswahlregeln . . . . .	303
16.1.1 Optische Matrixelemente . . . . .	303
16.1.2 Beispiele für das Symmetrieverhalten von Wellenfunktionen . . . . .	303
16.1.3 Auswahlregeln . . . . .	308
16.1.4 Auswahlregeln und Multipolstrahlung* . . . . .	311
16.2 Linienbreite und Linienform . . . . .	315
<b>17. Mehrelektronenatome</b> . . . . .	321
17.1 Das Spektrum des Helium-Atoms . . . . .	321
17.2 Elektronenabstoßung und Pauli-Prinzip . . . . .	323
17.3 Zusammensetzung der Drehimpulse . . . . .	324
17.3.1 Kopplungsmechanismus . . . . .	324

17.3.2	Die <i>LS</i> -Kopplung (Russel-Saunders-Kopplung) . . . . .	324
17.3.3	Die <i>jj</i> -Kopplung . . . . .	328
17.4	Magnetisches Moment von Mehrelektronenatomen . . . . .	330
17.5	Mehrfach-Anregungen . . . . .	331
	Aufgaben . . . . .	331
<b>18.</b>	<b>Röntgenspektren, innere Schale . . . . .</b>	<b>333</b>
18.1	Vorbemerkungen . . . . .	333
18.2	Röntgenstrahlung aus äußeren Schalen . . . . .	334
18.3	Röntgen-Bremsspektrum . . . . .	334
18.4	Linienpektrum in Emission: charakteristische Strahlung . . . . .	336
18.5	Feinstruktur der Röntgenspektren . . . . .	337
18.6	Absorptionsspektren . . . . .	340
18.7	Der Auger-Effekt . . . . .	343
18.8	Photoelektronen-Spektroskopie, ESCA . . . . .	344
	Aufgaben . . . . .	346
<b>19.</b>	<b>Aufbau des Periodensystems, Grundzustände der Elemente . . . . .</b>	<b>349</b>
19.1	Periodensystem und Schalenstruktur . . . . .	349
19.2	Von der Elektronenkonfiguration zum Atomterm. Grundzustände der Atome . . . . .	356
19.3	Atom-Anregungszustände und mögliche Elektronenkonfigurationen. Vollständiges Termschema . . . . .	359
19.4	Das Mehrelektronenproblem. Hartree-Fock-Verfahren* . . . . .	361
19.4.1	Das Zwei-Elektronenproblem . . . . .	361
19.4.2	Viele Elektronen ohne gegenseitige Wechselwirkung . . . . .	366
19.4.3	Coulombsche Wechselwirkung der Elektronen. Das Hartree- und das Hartree-Fock-Verfahren . . . . .	367
	Aufgaben . . . . .	370
<b>20.</b>	<b>Kernspin, Hyperfeinstruktur . . . . .</b>	<b>373</b>
20.1	Einflüsse des Atomkerns auf die Spektren der Atome . . . . .	373
20.2	Spin und magnetisches Moment von Atomkernen . . . . .	374
20.3	Die Hyperfein-Wechselwirkung . . . . .	376
20.4	Hyperfeinstruktur im Grundzustand des Wasserstoff-Atoms, des Natrium-Atoms und des Wasserstoff-ähnlichen Ions ${}_{83}\text{Bi}^{82+}$ . . . . .	381
20.5	Hyperfeinstruktur im äußeren Magnetfeld, Elektronenspin-Resonanz . . . . .	383
20.6	Direkte Messung von Spin und magnetischem Moment von Kernen, Kernspin-Resonanz . . . . .	387
20.7	Anwendungen der Kernspin-Resonanz . . . . .	391
20.8	Das elektrische Kern-Quadrupolmoment . . . . .	395
	Aufgaben . . . . .	397
<b>21.</b>	<b>Der Laser . . . . .</b>	<b>399</b>
21.1	Einige Grundbegriffe des Lasers . . . . .	399
21.2	Bilanzgleichungen und Laserbedingung . . . . .	402
21.3	Amplitude und Phase des Laserlichts . . . . .	406
	Aufgaben . . . . .	409

<b>22. Moderne Methoden der optischen Spektroskopie</b>	411
22.1 Klassische Methoden	411
22.2 Quanten-Schwebungen: Quantum beats	412
22.3 Doppler-freie Sättigungsspektroskopie	414
22.4 Doppler-freie Zwei-Photonen-Absorption	416
22.5 Niveau-Kreuzungsspektroskopie (Level crossing) und Hanle-Effekt	418
22.6 Laserkühlung von Atomen	420
22.7 Zerstörungsfreier Nachweis eines Photons – ein Beispiel aus der Atomphysik im Hohlraumresonator	425
Aufgabe	428
<b>23. Fortschritte der Quantenphysik:</b>	
<b>Tieferes Verständnis und neue Anwendungen</b>	429
23.1 Vorbemerkungen	429
23.2 Superpositionsprinzip, Interferenz, Wahrscheinlichkeit und Wahrscheinlichkeitsamplituden	429
23.3 Schrödingers Katze	431
23.4 Dekohärenz	431
23.5 Verschränkung (entanglement)	433
23.6 Das Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) Paradoxon	433
23.7 Bellsche Ungleichungen und die Hypothese verborgener Parameter	434
23.8 Experimente vom Bellschen Typ	437
23.9 Quantencomputer*	439
23.9.1 Einige geschichtliche Vorbemerkungen	439
23.9.2 Eine Erinnerung an digitale Computer	439
23.9.3 Grundkonzepte des Quantencomputers	440
23.9.4 Dekohärenz und Fehlerkorrektur	443
23.9.5 Ein Vergleich zwischen Quantencomputer und digitalem Computer	444
23.10 Quanteninformatiostheorie	444
23.11 Die Bose-Einstein-Kondensation	444
23.11.1 Eine Erinnerung an die statistische Physik	444
23.11.2 Die experimentelle Entdeckung	445
23.11.3 Quantentheorie des Bose-Einstein-Kondensats	447
23.12 Der Atom-Laser	448
Aufgaben	449
<b>24. Grundlagen der Quantentheorie der chemischen Bindung</b>	451
24.1 Vorbemerkungen	451
24.2 Das Wasserstoff-Molekülion $H_2^+$	451
24.3 Der Tunneleffekt	457
24.4 Das Wasserstoff-Molekül $H_2$	459
24.5 Kovalent-ionische Resonanz	466
24.6 Die Wasserstoffbindung nach Hund-Mulliken-Bloch	467
24.7 Die Hybridisierung	468
24.8 Die $\pi$ -Elektronen des Benzols $C_6H_6$	471
Aufgaben	473

**Mathematischer Anhang**

A. Die Diracsche Deltafunktion und die Normierung der Wellenfunktion eines kräftefreien Teilchens im unbegrenzten Raum . . . . .	475
B. Einige Eigenschaften des Hamiltonoperators, seiner Eigenfunktionen und Eigenwerte . . . . .	479
C. Herleitung der Heisenbergschen Unschärferelation . . . . .	480
<b>Lösungen zu den Aufgaben</b> . . . . .	<b>483</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> zur Ergänzung und Vertiefung . . . . .	<b>513</b>
<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	<b>521</b>
<b>Fundamental-Konstanten der Atomphysik</b> (Vordere Einbandinnenseite)	
<b>Energie-Umrechnungstabelle</b> (Hintere Einbandinnenseite)	